

ЭПТ 2015



ACED 2015

УДК 621.313-57

5.9. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ЗАПУСКА ДЛЯ ТРЕХКАСКАДНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА С ДЕМПФЕРНОЙ ОБМОТКОЙ

MATHEMATICAL MODEL OF THE STARTER SYSTEM FOR A THREE-STAGE SYNCHRONOUS GENERATOR WITH A DAMPING CAGE

Харитонов Сергей Александрович, д-р. техн. наук, зав. каф. «Электроники и электротехники» Новосибирского государственного технического университета, Россия, 630073, г. Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20. E-mail: indelect@ref.nstu.ru, Тел.: 8-383-3460864

Коробков Дмитрий Владиславович, старший преподаватель, м.н.с. каф. «Электроники и электротехники» Новосибирского государственного технического университета, Россия, 630073, г. Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20. E-mail: indelect@ref.nstu.ru, Тел.: 8-383-3460864

Жарков Максим Андреевич, аспирант каф. «Электроники и электротехники» Новосибирского государственного технического университета, Россия, 630073, г. Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20. E-mail: maks.zharkoff@yandex.ru, Тел.: 8-383-3460864

Симин Василий Сергеевич, аспирант каф. «Электротехнических комплексов и материалов» Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: simin.vs@yandex.ru, Тел.: 8-3822-563787

Бачурин Петр Александрович, ассистент каф. «Электроники и электротехники» Новосибирского государственного технического университета, Россия, 630073, г. Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20. E-mail: kafedraee.nstu@mail.ru, Тел.: 8-383-3460864

Sergey A. Kharitonov, Doctor Sc., Novosibirsk State Technical University, 630073, K. Marksa street, 20, Novosibirsk, Russia. E-mail: indelect@ref.nstu.ru. Ph.: +7-383-3460864

Dmitriy V. Korobkov, Researcher, Novosibirsk State Technical University, 630073, K. Marksa street, 20, Novosibirsk, Russia. E-mail: indelect@ref.nstu.ru. Ph.: +7-383-3460864

Maksim A. Zharkov, postgraduate student, Novosibirsk State Technical University, 630073, K. Marksa street, 20, Novosibirsk, Russia. E-mail: maks.zharkoff@yandex.ru. Ph.: +7-383-3460864

Vasiliy S. Simin, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University, 634050, Lenin Avenue, 30, Tomsk, Russia. E-mail: simin.vs@yandex.ru. Ph.: +7-3822-563787

Petr A. Bachurin, Researcher, Novosibirsk State Technical University, 630073, K. Marksa street, 20, Novosibirsk, Russia. E-mail: kafedraee.nstu@mail.ru. Ph.: +7-383-3460864

Аннотация: В данной статье рассматривается математическая модель стартерной системы для газотурбинных двигателей. Модель исследуемого трехкаскадного синхронного генератора была построена в системе d-q-координат. Полученная модель позволяет сконфигурировать параметры машины в широком диапазоне, а также получить информацию о токах и напряжениях основных электрических узлов машины. Математическое моделирование показало эффективность полученной модели и адекватность предложенного алгоритма электростартерного запуска синхронной машины.

Abstract: This paper, considers a mathematical model the starter system for gas turbine engines. Model of the investigated three-stage synchronous generator has been built in the dq-coordinates. The obtained model allows one to configure the machine parameters in a wide range, as well as receive information about currents and voltages major electrical components of the machine. Mathematical modeling shown efficiency of the resulting model and adequacy of the proposed algorithms electric starter mode synchronous machine.

Ключевые слова: трехкаскадный генератор, управление, запуск, демпферная обмотка.

Key words: a three-stage generator, control, starter mode, damper winding.

ВВЕДЕНИЕ

Стартер-генераторное устройство (СГУ) состоит из синхронной электрической машины с обмоткой

возбуждения и полупроводникового преобразователя (ПП), который формирует из напряжения 27В необходимые напряжения для статорной обмотки и обмотки возбуждения.

Стартер-генератор (СтГ) представляет собой трехкаскадную синхронную электрическую машину, у которой основной каскад выполнен с демпферной клеткой, обмотка возбуждения запитана от напряжения вращающегося выпрямителя, его входы подсоединены к трехфазной обмотке возбудителя. Возбудитель имеет неподвижную выведенную обмотку возбуждения, подвозбудитель представляет собой трехфазный магнитоэлектрический синхронный генератор, предназначенный для обеспечения режима самовозбуждения.

РЕЖИМ ЭЛЕКТРОСТАРТЕРНОГО ЗАПУСКА

Известно, что запуск синхронного двигателя требует датчика положения ротора, в противном случае возможен «обратный ход» вала электродвигателя. Для исключения подобного явления предлагается на начальном этапе запуска использовать режим асинхронного запуска за счет использования демпферной клетки. При достижении определенной частоты вращения осуществляется переход в синхронный запуск. Момент перехода определяется величиной напряжения на выходе подвозбудителя, которая позволяет уверенно использовать этот сигнал для определения положения ротора. Эта частота вращения на первом этапе моделирования процессов может быть принята равной $n_{ac} \approx 800$ об/мин.

На интервале асинхронного запуска $0 < n < n_{ac}$ принят закон управления, обеспечивающий на механической характеристике режим постоянства электромагнитного момента. Решение этой задачи возможно путем применения с помощью инвертора напряжения закона Костенко, который математически формулируется следующим образом:

$$\frac{U}{f} = const, \quad (1)$$

где U , f – напряжение и его частота на входе стартер-генератора.

Более благоприятные характеристики электрический двигатель имеет при регулировании по закону постоянства магнитного потока. В этом случае для поддержания максимального момента неизменным требуется иметь постоянный магнитный поток, т. е. при регулировании частоты f должно соблюдаться условие $E/f = const$, где E – ЭДС статора.

Для обеспечения неизменного магнитного потока питающее напряжение U должно изменяться по закону:

$$U \approx a + b \cdot f, \quad (2)$$

где a и b – постоянные величины.

Для частот вращения $n > n_{ac}$ реализуется синхронный режим «раскрутки» стартер-генератора. В этом случае подается постоянное напряжение на обмотку возбуждения возбудителя.

ОПИСАНИЕ СИСТЕМЫ

На рис.1 представлена анализируемая структурная схема стартер-генераторного устройства (СГУ). В состав СГУ устройства входят: стартер-генератор, блок регулирования и защиты (БРЗ) и электронный блок стартерного запуска (ЭБСЗ).

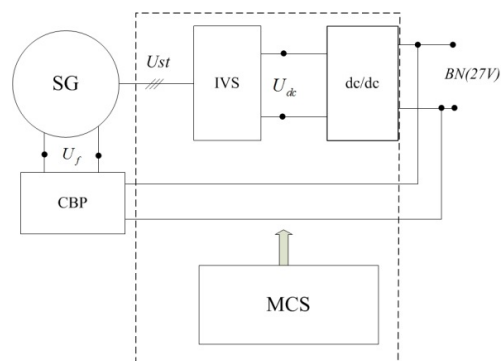


Рис. 1. Структурная схема

СтГ представляет собой трехкаскадную синхронную электрическую машину, у которой основной каскад выполнен с демпферной клеткой, обмотка возбуждения запитана от напряжения вращающегося выпрямителя, его входы подсоединены к трехфазной обмотке возбудителя. Возбудитель имеет неподвижную выведенную обмотку возбуждения, подвозбудитель представляет собой трехфазный магнитоэлектрический синхронный генератор, предназначенный для обеспечения режима самовозбуждения. Структурная схема представлена на рис. 2.

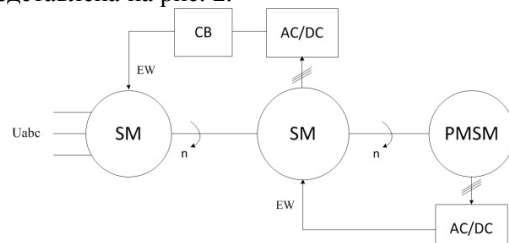


Рис. 2. Структурная схема

БРЗ формирует из напряжения 27В необходимое по значению постоянное напряжение на обмотке возбуждения возбудителя, а также переменное напряжение с целью повышения выходного напряжения возбудителя на малых значениях частоты вращения вала стартер-генератора.

ЭБСЗ включает в себя инвертор напряжения (ИН), повышающий преобразователь постоянного напряжения (dc/dc) и микропроцессорную систему управления (МПСУ).

Инвертор напряжения (ИН) предназначен для формирования трехфазного регулируемого по величине и частоте напряжения, которое подается на статорные обмотки основного каскада стартер-генератора. Преобразователь постоянного напряжения (dc/dc) осуществляет функцию повышения напряжения бортовой сети до

величины, необходимой ИН. МПСУ осуществляет управление всеми блоками ЭБСЗ, реализует синтезированный алгоритм стартерного запуска, а также выполняет функции встроенного контроля и защиты.

На рис. 3 представлена структурная схема системы управления.

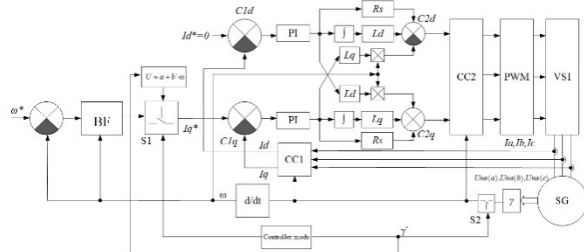


Рис. 3. Структурная схема

На рис. 3 ПК1, ПК2 – преобразователи координат, П1, П2 – переключатели режимов «асинхронный режим» - «синхронный режим», «Контроллер режимов» задает режим запуска и формирует параметрически функцию γ , обеспечивающую заданный темп увеличения частоты вращения вала в асинхронном режиме. В алгоритме управления реализована двухконтурная система управления [2]. Во внешнем контуре по скорости задается уставка на угловую частоту (ω^*), сигнал обратной связи ω вычисляется дифференцированием сигнала γ , взятым с датчика положения вала СГ. Разница сигнала задания и обратной связи по скорости поступает на ПИ-регулятор. Во внутреннем контуре по току статора сигналы задания I_q^* и I_d^* сравниваются с сигналами обратной связи токов статора, переведенных с помощью блока ПК1 (преобразователь координат) в d-q-координаты. Сигнал ошибки токов по d- и q-осям поступает на ПИ-регулятор. Далее из полученных сигналов осуществляется формирование моделирующих сигналов в d-q координатах, которые, в свою очередь, поступают на ПК2. Полученная после преобразования координат трехфазная система моделирующих сигналов подается на ШИМ модуль.

ОПИСАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Моделирование системы производилось в среде PSIM, в которой имеется стандартный блок синхронной машины. При изучении встроенного блока выяснилось, что все параметры электрической машины приводятся к статорной стороне. Поэтому для получения значений токов и напряжений обмоток возбуждения машин без пересчета к статорной обмотке, а также для ускорения процесса моделирования, была создана математическая модель синхронной машины с демпферной обмоткой, синхронной машины и синхронной машины с возбуждением от постоянных магнитов (рис. 4 – 6). Данные математические модели были составлены по электромеханическим уравнениям соответствующих машин.

Уравнения для синхронной машины с демпферной обмоткой:

$$U_d = L_d \frac{d}{dt} i_d + M_{ad} \frac{d}{dt} i_f - L_q i_q \omega + r_a i_d + M_{ad} \frac{d}{dt} i_{od} - M_{aq} i_{oq} \omega$$

$$U_q = L_q \frac{d}{dt} i_q + L_d i_d \omega + M_{ad} i_f \omega + r_a i_q + M_{aq} \frac{d}{dt} i_{oq} + M_{ad} i_{od} \omega$$

$$U_f = L_f \frac{d}{dt} i_f + M_{ad} \frac{d}{dt} i_d + r_f i_f + M_{ad} \frac{d}{dt} i_{od}$$

$$0 = L_{od} \frac{d}{dt} i_{od} + M_{ad} \frac{d}{dt} i_d + M_{ad} \frac{d}{dt} i_f + r_{od} i_{od}$$

$$0 = L_{oq} \frac{d}{dt} i_{oq} + M_{aq} \frac{d}{dt} i_q + r_{oq} i_{oq}$$

Уравнения для синхронной машины:

$$U_d = L_d \frac{d}{dt} i_d + M_{ad} \frac{d}{dt} i_f - L_q i_q \omega + r_a i_d$$

$$U_q = L_q \frac{d}{dt} i_q + L_d i_d \omega + M_{ad} i_f \omega + r_a i_q$$

$$U_f = L_f \frac{d}{dt} i_f + M_{ad} \frac{d}{dt} i_d + r_f i_f$$

Уравнения для синхронной машины с возбуждением от постоянных магнитов:

$$U_d = L_d \frac{d}{dt} i_d - L_q i_q \omega + r_a i_d$$

$$U_q = L_q \frac{d}{dt} i_q + L_d i_d \omega - \psi_f \omega + r_a i_q$$

Модели системы управления и синхронных машин построены в d-q-координатах, поэтому сигналы U_d и U_q из системы управления подаются непосредственно в математическую модель синхронной машины. Все три синхронные машины объединены общим сигналом угловой частоты ω [рад/сек], который формируется в синхронной машине с демпферной обмоткой. Контур возбуждения возбудителя питается от выпрямленного напряжения с обмоток статора подвозбудителя. Сформированные в возбудителе напряжения U_d и U_q переводятся в abc-координаты, затем полученное трехфазное напряжение подается на выпрямитель и заводится в контур возбуждения математической модели основного каскада.

Для контроля функционирования стартер-генераторного устройства в модели введены расчеты углового положения вала, скорости его вращения, а также датчики токов, напряжений и моментов.

Структурная схема математической модели системы управления приведена на рис. 7. и включает в себя СУ ЭБСЗ, СУ БРЗ и СУ Мс.

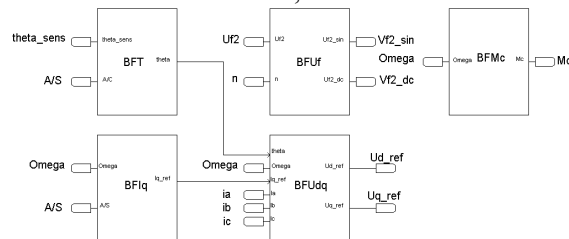


Рис. 7. Математическая модель системы управления.

Согласно вышеописанному алгоритму была построена система управления рис. 8.

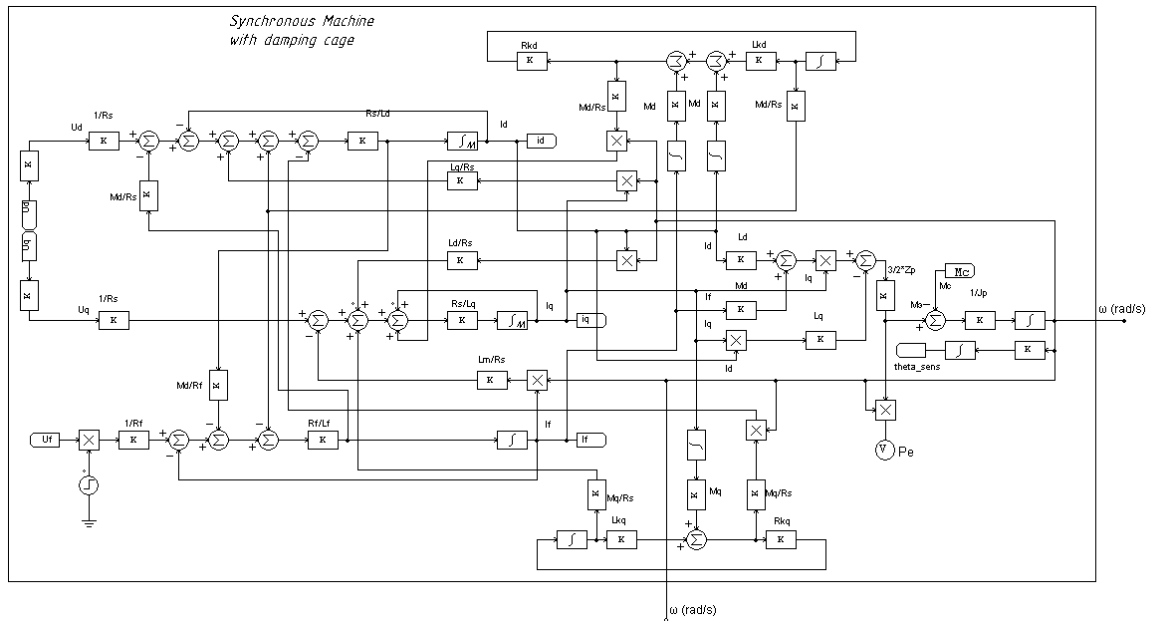


Рис. 4. Математическая модель синхронной машины

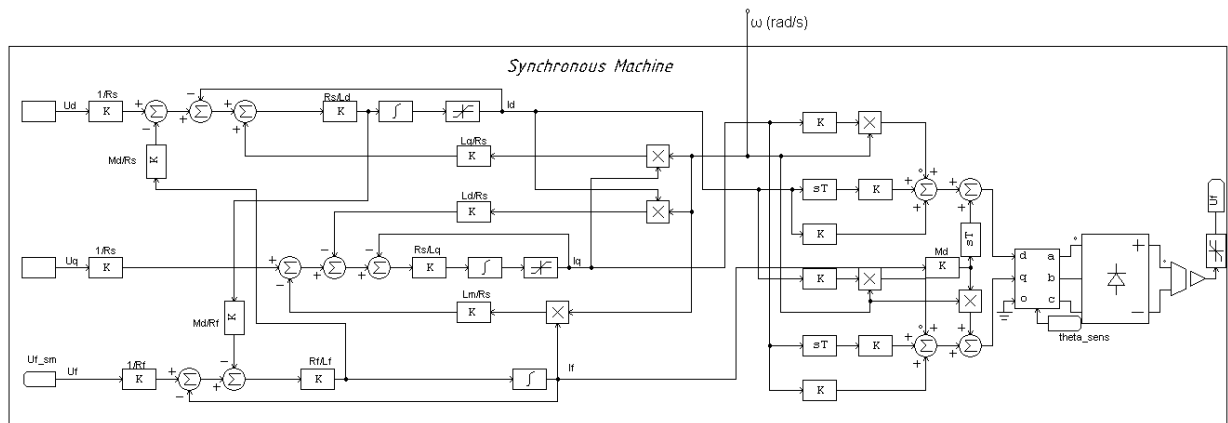


Рис. 5. Математическая модель синхронной машины

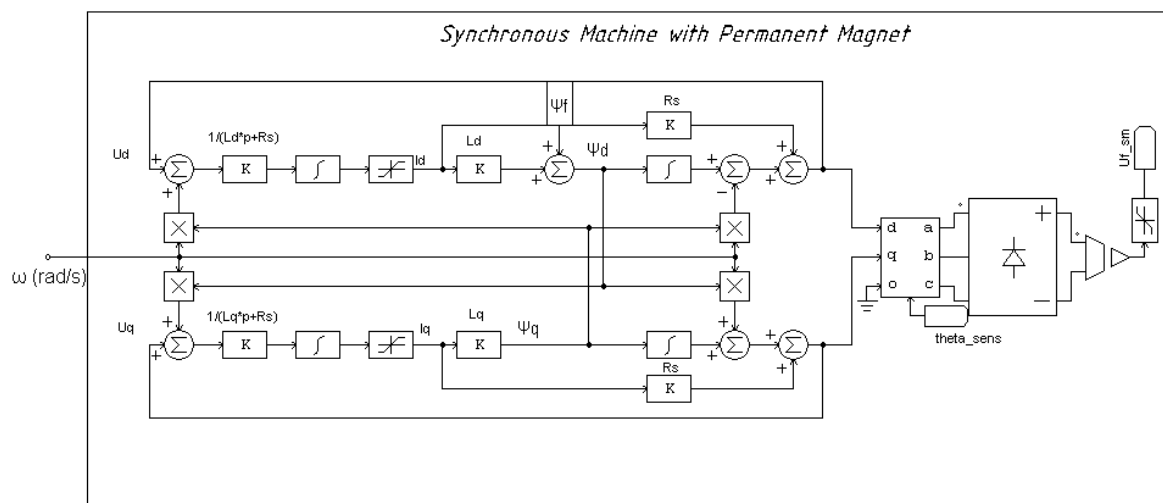


Рис. 6. Математическая модель синхронной машины

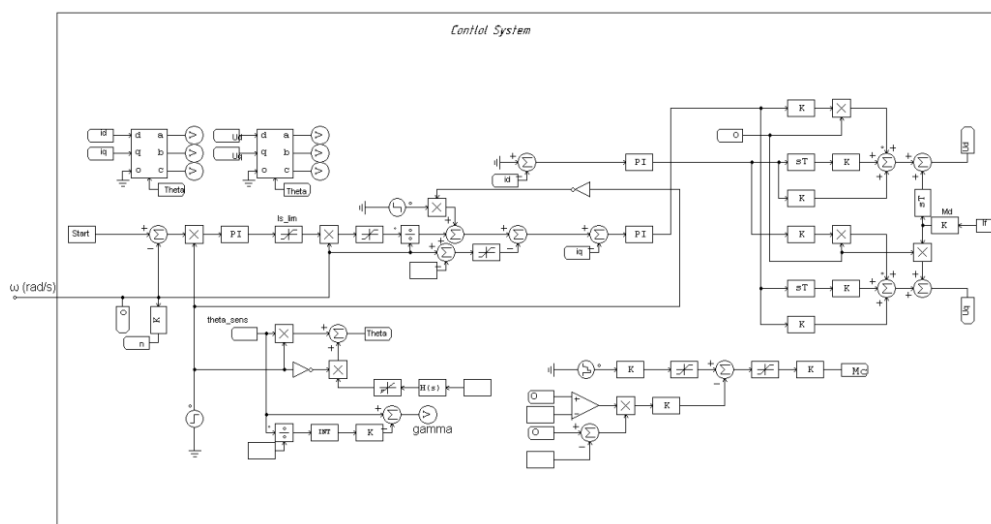


Рис. 8. Математическая модель системы управления.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Ниже представлены результаты моделирования в среде PSIM. В табл. 1 приведены основные параметры моделирования трехкаскадного двигателя. На рис.9 представлены осциллограммы скорости вала и мощность на валу. Из осциллограммы видно, что скорость практически равномерно нарастает до номинальных оборотов, а мощность держится постоянной. Рис. 10 содержит осциллограммы тока и напряжения фазы статора. На рис. 11 представлены электромагнитный момент и момент сопротивления на валу.

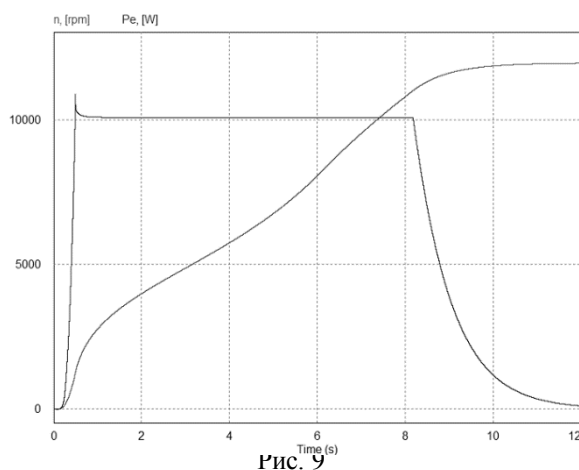
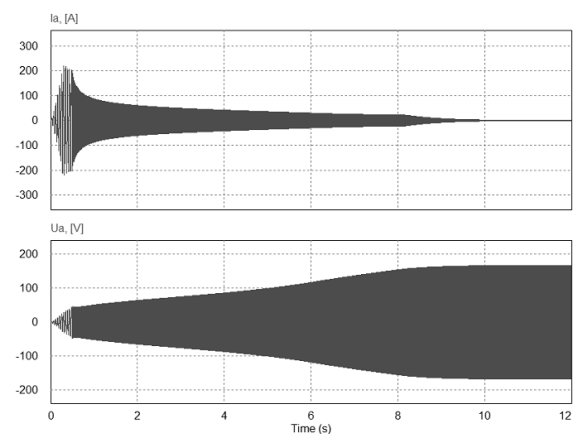


Таблица 1.

Параметры моделируемого двигателя

Параметр	Значение
Номинальная мощность, кВт	10
Номинальная частота вращения вала генератора, Об./мин.	12000
Максимальный момент сопротивления на валу, Н*м	29
Момент инерции, кг*м ²	0,03
Полная продольная индуктивность по d оси, мГн	577
Полная продольная индуктивность по q оси, мГн	457
Активное сопротивление фазы, Ом	0,0127
Индуктивность обмотки возбуждения, мГн	82
Активное сопротивление обмотки возбуждения, Ом	2,86



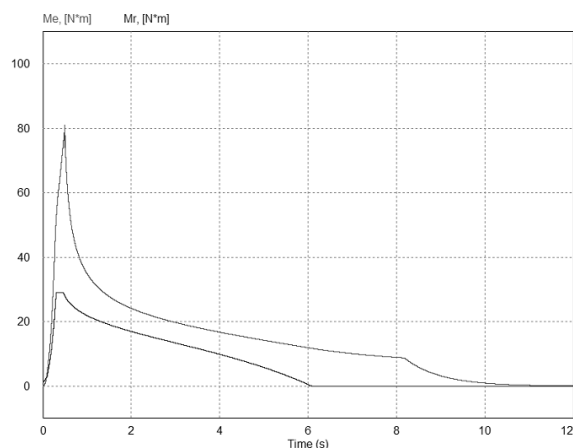


Рис. 11

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье описывается вариант электростартерного режима трехкаскадного синхронного генератора. Приведено описание силовой схемы и системы управления. С помощью

математического моделирования подтверждается ее работоспособность.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Копылов И.П. Проектирование электрических машин. — М.: Энергия, 1980. 495с.
2. Слежановский О.В. и др. Системы подчиненного регулирования электроприводов переменного тока с вентильными преобразователями/ - М.: Энергоатомиздат, 1983.- 256 с.
3. Харитонов С.А. Электромагнитные процессы в системах генерирования электрической энергии для автономных объектов. Монография / С.А. Харитонов – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – 536 с.
4. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины: Учебник для ВУЗов. - М.: Энергия, 1980. - 928 с.